

人字型水旱两用旋埋刀辊设计与试验

祝英豪^{1,2} 张居敏^{1,2} 曾 荣^{1,2} 张文良^{1,2} 杨全军^{1,2} 夏俊芳^{1,2}

(1. 华中农业大学工学院, 武汉 430070; 2. 农业农村部长江中下游农业装备重点实验室, 武汉 430070)

摘要: 为适应长江中下游水旱轮作多熟制稻作区的秸秆还田与土壤耕作,降低现有组合刀辊的作业功耗和轴向负载,开展了螺旋横刀排列方式及结构参数的相关研究。根据对刀辊轴向受力的理论分析,提出平衡刀辊轴向力的初步方案,采用离散元软件模拟不同排列形式的螺旋横刀对土壤的切削过程,仿真结果表明,人字型排列方式的轴向负载稳定性与切削阻力优于锯齿型和交错型。基于人字型排列原则,重新规划旋耕刀的布局并设计配套刀盘,形成一种人字型水旱两用旋埋刀辊。为了进一步降低刀辊功耗,建立螺旋横刀切削土壤的数学模型,分析安装角与刀宽对切削阻力及秸秆埋覆效果的影响,并进行优化。为验证刀辊优化后的区域适用性及减阻效果,进行了田间试验。试验结果表明:人字型水旱两用旋埋刀辊适用于大多数水稻田的秸秆埋覆与土壤耕作,其中耕深均值为18.10 cm、耕深稳定性系数均值为92.75%、耕后单幅平整度均值为2.00 cm、秸秆埋覆率均值为92.60%,均满足设计要求。同时,在不降低秸秆埋覆率的前提下,人字型刀辊较交错型刀辊降低功耗0.34%~17.01%;50°安装角的螺旋横刀的刀辊较35°安装角螺旋横刀的刀辊降低功耗6.81%~16.46%,达到了优化目的。

关键词: 多熟制稻作区; 秸秆还田; 人字型刀辊; 螺旋横刀

中图分类号: S222.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2019)04-0049-09

Design and Experiment of Herringbone Type Rotary Blade Roller for Burying Stubble in Paddy Field and Dry Land

ZHU Yinghao^{1,2} ZHANG Jumin^{1,2} ZENG Rong^{1,2} ZHANG Wenliang^{1,2} YANG Quanjun^{1,2} XIA Junfang^{1,2}

(1. College of Engineering, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China

2. Key Laboratory of Agricultural Equipment in Mid-lower Yangtze River, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Wuhan 430070, China)

Abstract: In order to deal with the problems of straw returning and soil tillage in multiple cropping rice regions of paddy-upland rotation in mid-lower Yangtze River, and reduce the power consumption and axial force of the existing interlaced-type rotary blade roller, a research about arrangement and structure parameters of the helical blades in combined cutter roller was conducted. Based on the theoretical analysis of the axial force of cutter roller, two arrangements for balancing axial forces were proposed and verified by discrete element software. The simulation results showed that the axial load stability and cutting resistance of herringbone arrangement were better than that of serrated and interlaced type. Based on the principle of herringbone type arrangement, the rotary blades were rearranged and the supporting cutter plate was designed. In order to further reduce the power consumption of the cutter roller, the mathematical model of cutting soil with helical blades was established. Based on the mathematical model, the influence of installation angle and blade width on cutting resistance and straw burying effect was analyzed, and the optimization of the installation angle and blade width was carried out accordingly. Field tests were carried out to verify the applicability and drag reduction effect of the optimized cutter roller. The testing results showed that the optimized cutter roller was suitable for straw returning and soil tillage for most paddy fields, and the average tillage depth was 18.10 cm, the stability of the tillage depth was 92.75%, the smoothness after tillage was 2.00 cm, and the straw buried rate was 92.60%, which can all meet the design requirements. The results also showed that without reducing the straw buried rate, the

收稿日期: 2018-10-31 修回日期: 2019-01-14

基金项目: 公益性行业(农业)科研专项(201503136)、国家重点研发计划项目(2017YFD0301303)和国家自然科学基金项目(51605182)

作者简介: 祝英豪(1991—),男,博士生,主要从事现代农业装备设计及测控研究,E-mail: zhuyinghao@webmail.hzau.edu.cn

通信作者: 夏俊芳(1963—),女,教授,博士生导师,主要从事现代农业装备设计及测控研究,E-mail: xjf@mail.hzau.edu.cn

power saving range of the herringbone-type rotary blade roller was 0.34% ~ 17.01% compared with the interlaced-type rotary blade roller, and the power saving range of the blade roller assembling helical blades with 50° installation angle was 6.81% ~ 16.46% compared with helical blades with 35° installation angle, which verified that the proposed blade roller can achieve the aim of optimization. The research result provided new technical equipment for the direct full amount of straw returning to the field.

Key words: multiple cropping rice regions; straw return; herringbone type cutter roller; helical blades

0 引言

水旱轮作是符合长江中下游多熟制稻作区周年农时季节要求的主要种植制度之一^[1]。长期以来,传统的耕作方式及过度的化肥依赖导致土壤结构破坏,生态环境恶化^[2-3]。秸秆还田能够增加土壤活性、恢复地力,同时避免秸秆焚烧,缓解茬口农时紧张,是解决水旱轮作区土壤耕作及秸秆处理问题的首选方案^[4-8]。

目前,传统的旋耕刀辊使用较为普遍,由于其刀轴防缠性能和秸秆埋覆效果不理想,使其应用受秸秆切碎长度及留茬高度的限制。因此,为耕作部件创造适耕环境成为现阶段联合收获机的附加作业任务,这势必加重联合收获机的负荷,降低收割效率及质量。为增强作业机具在秸秆地的通过性,为后续栽播提供优质种床,郑智旗等^[9]和林静等^[10]分别设计了一种将粉碎的秸秆收集后埋入沟中的还田装备,但在长江中下游水旱轮作区,土壤常年干湿交替,粘结性强,秸秆量多、留茬高、韧性大,秸秆粉碎程度难以满足要求,且易在水田中形成漂茬或与土壤混合粘附在一起影响收集效果,因此粉碎入沟的还田方式常用于质地较脆的小麦、玉米等旱作物秸秆及非粘性土壤区域。为了解决水稻秸秆在湿粘环境下的还田问题,高茬、整株秸秆直接旋埋的思路逐渐应用于秸秆还田耕整机具的设计中^[11-12]。

本课题组多年从事机械化秸秆还田技术研究,提出高茬水稻秸秆直接掩埋的还田技术,研制的水旱两用秸秆还田组合刀辊^[13]将螺旋横刀与传统的旋耕弯刀以螺旋交错的排列方式有机地结合为一体,兼顾水田和旱地,有效防止秸秆缠绕刀轴,避免秸秆预粉碎处理,一次耕作即可满足栽培的农艺要求。但该刀辊仍存在受力不均匀、功耗偏高等问题,致使推广受阻。为此,本文利用离散元软件(EDM)仿真分析螺旋横刀排列方式与刀辊卸载的关系,选择最优排列,并基于这种排列对刀辊其他部件及布局进行设计;为进一步降低作业功耗,建立螺旋横刀切削土壤的数学模型,对影响切削阻力的相关参数进行优化,最终设计一种人字型水旱两用旋埋刀辊,以期为解决水旱轮作模式中的秸秆直接还田问题提供相应技术装备。

1 螺旋横刀排列方式离散元仿真分析

离散元法(Discrete element method, DEM)广泛应用于土壤耕作部件的优化、设计与机理分析^[14-16]。旋耕刀辊切削土壤的受力关系复杂,通过田间试验很难测得刀辊真实的受力情况,因此利用离散元法构建土壤模型,借助仿真试验,对刀辊的排列方式进行优化分析。

1.1 刀辊建模

合理的刀具排列方式有利于减小刀辊功耗、延长机具使用寿命,提升作业质量的稳定性^[17]。现有组合刀辊同一分段区间刀具相隔 120°均匀分布,相邻分段区间刀具旋向相反,前段刀辊螺旋横刀末端与后段螺旋横刀始端错开 60°以螺旋交错的方式排列,如图 1a。理想状态下,令每段刀辊轴向力为 $f(\omega t + \varphi_0)$,则整辊轴向力 $F(t)$ 为

$$F(t) = 3f\left(\omega t + \frac{\pi}{180}\varphi_0\right) - 3f\left(\omega t + \frac{\pi}{180}\varphi_0 + \frac{\pi}{3}\right)$$

(1)

式中 ω ——刀辊转动角速度,rad/s
 t ——刀辊转动时间,s
 φ_0 ——刀辊初始相位角,(°)

从式中可以看出刀辊的轴向力始终无法抵消,一方面土壤的侧向反作用力致使刀具切土产生额外的摩擦阻力;另一方面导致机具横向偏移晃动。对称的排列方式可保证互为反向的刀具在任一时刻入土程度相同、数量相等,能有效避免上述情况的发

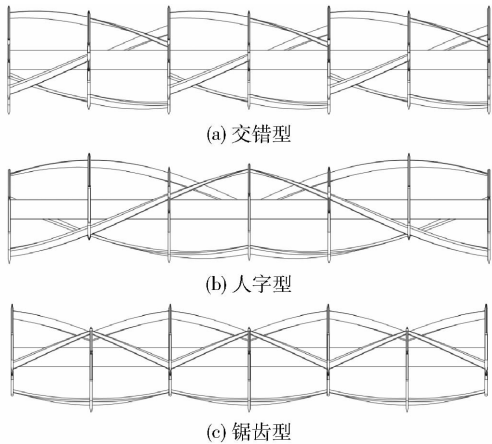


图 1 螺旋横刀排列方式示意图

Fig.1 Sketches of arrangement mode of helical blades

生。螺旋横刀刀身为大螺距螺旋体,横向跨度大,为了达到对称排列的目的,需将各段螺旋横刀首尾相连,有人字型与锯齿型两种排列方式,如图 1b、1c 所示。

为综合分析刀辊的受力情况,选取轴向力和沿周向的扭矩作为响应值,考虑到组合刀辊中旋耕刀的最优排布根据螺旋横刀排列方式的不同互有差异,在 3 种刀辊模型中仅对螺旋横刀进行装配,目的是排除旋耕刀布局中与排列方式无关的变量对刀辊响应值的干扰。

1.2 土壤模型的构建

长江中下游稻作区土壤为粘性质地,土壤之间粘结性强,含水率大,宜选用 EDEM 软件中 Hertz-Mindlin with Bonding 模型作为土壤颗粒间的接触模型,该模型以土壤颗粒间设置粘结键的方式表征湿粘土壤的团聚行为^[18]。粘结键可以承受和传递一定的力与力矩,共有 5 个接触参数描述该键的粘结特性,其中法向刚度与切向刚度用来计算粘结键所受的载荷;法向临界应力与切向临界应力用来计算粘结键断裂所需要的载荷;粘结半径表示颗粒间产生粘结键所需要的距离。为了简化模型,使切向参数与法向参数在数值上相等^[14,19],同时认为土壤之间的粘结源于土粒间的液桥,所以可用粘结半径衡量土壤含水率^[20]。模拟土壤时,粘结刚度的数量级为 $10^7 \sim 10^8 \text{ N/m}^3$,临界应力数量级为 $10^4 \sim 10^5 \text{ Pa}$ ^[19,21],水旱轮作多熟制稻作区土壤干湿交替,含水率常年在 25%~45% 之间,且土壤破坏所需的外力随含水率增大而减小,考虑到本研究的适用范围,选择高、中、低 3 个水平模拟土壤所处的 3 个湿度状态,分别开展 3 种刀辊的仿真试验,选用的接触模型参数如表 1 所示。其中颗粒形状采用最常用的圆球模型,半径设置为 8 mm;土壤颗粒的本征参数密度、剪切模量、泊松比是材料自身固有的特性参数,依次为^[18] $1\,208 \text{ kg/m}^3$ 、 $6 \times 10^7 \text{ Pa}$ 、0.38;材料基本接触参数为各材料之间的碰撞恢复系数、滚动摩擦因数和静摩擦因数,分别设置为^[22] 0.2、0.3、0.4(土壤-土壤)和 0.3、0.05、0.5(土壤-45 号钢)。

表 1 土壤颗粒粘结参数

Tab. 1 Bond parameters of soil particles

土壤编号	含水率/ %	粘结刚度/ ($\text{N} \cdot \text{m}^{-3}$)	粘结临界 应力/Pa	粘结半径/ mm
1	45	1×10^8	1×10^5	10.2
2	35	5×10^8	5×10^5	9.5
3	25	9×10^8	9×10^5	9.0

1.3 EDEM 仿真过程

根据刀辊幅宽,在模型中建立尺寸(长×宽×

高)为 $2\,500 \text{ mm} \times 2\,400 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$ 土槽箱,在土槽箱上表面设置颗粒工厂,以重力沉积法生成 478 527 个土壤颗粒,导出颗粒文件。在颗粒文件中设置接触模型,输入粘结参数并导入刀辊模型。刀辊材质为 45 号钢,密度、剪切模量、泊松比依次为 $7\,850 \text{ kg/m}^3$ 、 $7.9 \times 10^{10} \text{ Pa}$ 、0.3。刀辊转速 250 r/min ($0 \sim 2.8 \text{ s}$),垂直入土速度 0.75 m/s ($0 \sim 0.2 \text{ s}$),前进速度 0.8 m/s ($0.2 \sim 2.8 \text{ s}$),0.001 s 时对土壤颗粒进行粘结,固定时间步长为 $1.24 \times 10^{-5} \text{ s}$,由于颗粒较多,为缩短仿真周期,设置以刀辊为中心,与刀辊同步平动,尺寸(长×宽×高)为 $800 \text{ mm} \times 2\,400 \text{ mm} \times 800 \text{ mm}$ 的动态仿真域。动态仿真域外的颗粒,以 0.01 s 为检测间隔,设定连续 3 次检测位移均小于自身半径的 5% 时,颗粒处于暂时“冻结”状态,软件不再更新这些颗粒的数据,直至进入动态仿真域后被激活,仿真模型如图 2 所示。

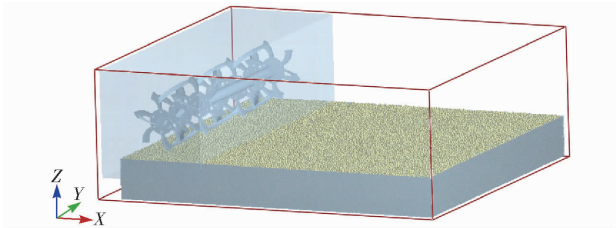


图 2 仿真模型

Fig. 2 Simulation model

1.4 仿真结果与分析

仿真完成后,依次在软件中输出刀辊的轴向力与扭矩数据,由轴向力标准差 F_s 评价轴向受载稳定性情况,由扭矩均值 T_e 评价刀辊周向受载情况,结果如图 3 所示。

在图 3 中,各刀辊在高、中、低 3 个含水率水平的土壤模型下,受载变化趋势相同,响应值随土壤含水率的降低而升高,说明粘结参数的选取符合湿度的要求。同类土壤模型,轴向受载稳定性从低到高依次为:交错型、锯齿型、人字型,周向受载从大到小依次为:锯齿型、交错型、人字型,这种排序并不受土壤模型影响,说明响应值的变异主要来源于螺旋横刀的排列方式。

当刀辊对土壤颗粒切削时,锯齿型的排列方式共有 6 把螺旋横刀同步参与切削作业,交错型与人字型分别为 3 把与 2 把,所以人字型刀辊工作更加平稳,切削阻力更小(图 3b)。交错型的非对称结构造成轴向力波动较大,稳定性较差;锯齿型与人字型同为对称结构,轴向受载理应相同,但图 3a 中显示人字型轴向受载稳定性明显较优,这是因为离散元模型中土槽里的土壤颗粒随机生成并排列,各位置处颗粒分布不均匀,这与田间的实际情况类似,轴向

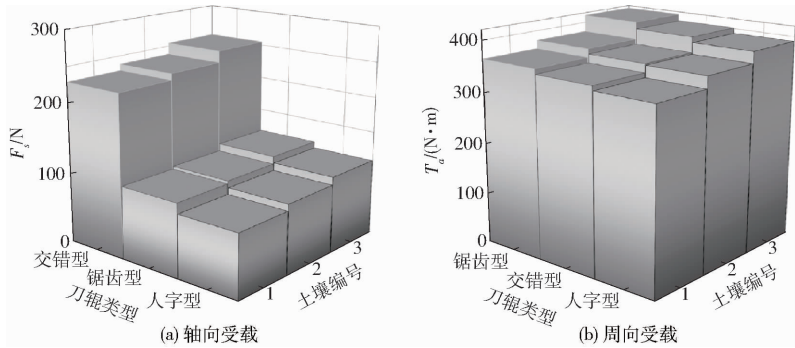


图 3 不同土壤模型螺旋横刀各排列方式受载对比示意图

Fig. 3 Schematics of loading comparison of different arrangement helical blades under different soil models

力的波动与颗粒不均匀相关,而锯齿型刀辊切削阻力较大,强化了这种不均匀性引起的轴向力波动。综上,人字型排列方式的轴向受载稳定性与切削阻力均优于锯齿型和交错型,因此选用人字型的排列方式对刀辊进行优化设计。

2 刀辊零部件优化设计

2.1 刀盘设计

刀盘上共设有 6 个用于安装旋耕刀的径向通槽和 3 个安装弯刀的轴向通槽,轴向通槽相隔 120°均匀分布,径向通槽位于轴向通槽两侧,与轴向通槽的夹角为 β ,为防止各刀槽相互干涉, β 设置为 37.8°,刀盘结构如图 4 所示。

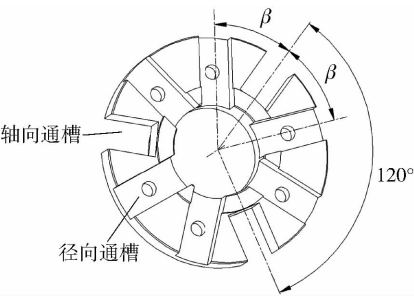


图 4 刀盘结构示意图

Fig. 4 Structural schematic of cutter head

螺旋横刀焊接在两弯刀之间,并由弯刀安装在刀盘上,人字型的排列方式需将相邻的螺旋横刀首尾相连,为实现这种排列方式,在刀盘上开设轴向通槽,相邻的螺旋横刀焊接组件中互为反向的弯刀相贴合共同占用一个轴向通槽,两侧由夹板通过螺栓连接进行轴向固定,挡板焊接在刀盘外缘,防止夹板、弯刀、螺栓整体沿槽滑移,起到径向定位的作用。刀盘轴向通槽的设置,解决了螺旋横刀的安装问题,为轴向通槽的设置预留了空间,同时解决了螺旋横刀焊接组件无法整体拆装的问题,解除轴向固定后,沿轴向可替换拆装螺旋横刀焊接组件,便于刀辊的维护与更换。

刀盘径向通槽加装旋耕刀,一方面,螺旋横刀入

土侧与刀盘在同一回转面上,可使螺旋横刀率先切土的一端始终工作在旋耕刀已耕区域内,有利于减轻螺旋横刀的入土阻力,增强了螺旋横刀的切土和秸秆埋覆性能;另一方面,传统旋耕刀辊为了防止壅土现象,往往采用小升角双螺旋排列,相邻两旋耕刀之间至少相差 24°^[23],而在交错型组合刀辊中,由于螺旋横刀结构尺寸及排列方式的限制,旋耕刀必须安装在刀盘之间的刀座中,两旋耕刀的夹角不足 15°,刀盘加装旋耕刀,充分利用刀辊轴向间隙,增加两刀的间距以弥补夹角过小的不足。

2.2 旋耕刀排列

2.2.1 旋耕刀轴向排列

为配合人字型排列布局的要求,旋耕刀轴向排列如图 5 所示。每段刀辊中安装在刀座中的旋耕刀以刀盘旋耕刀为初始位置按螺旋线均匀排布,且每条排布螺旋线的升角与螺旋横刀的升角 δ 相等,刀辊同侧相邻两旋耕刀轴向间距相等。同侧的 3 段(第 1、2、3 段为左侧,第 4、5、6 段为右侧)刀辊之间旋耕刀排布螺旋线升角、旋向相同,安装同向刀具,初始相位角以螺旋横刀轴向转角 α_L 为公差呈等差数列;异侧相对称的 3 组刀辊之间排布螺旋线初始相位角、升角相同,旋向相反,安装反向旋耕刀。

人字型刀辊规定左侧装左旋耕刀,右侧装右旋耕刀,两侧采用同向相继切土,使旋耕刀将切下的土壤向两边推移,除左右两侧第一列旋耕刀外,其它旋

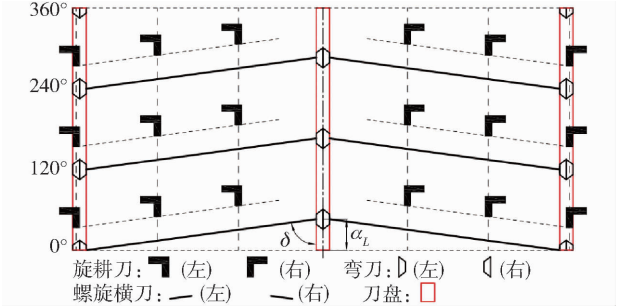


图 5 刀辊中间区域(第 3、4 段)刀具排列展开图

Fig. 5 Arrangement drawing of blades in middle area (the third and fourth parts) of blade roller

耕刀切土时减少了一个约束面,使土壤更容易破坏,并达到旋耕节能降耗的目的^[24]。每段刀辊中旋耕刀与螺旋横刀对土壤的轴流侧推方向相反,螺旋横刀将已侧移的土壤拉回由拖板抹平,有效提高了耕后的地表平整度。

2.2.2 旋耕刀周向排列

刀辊功能的实现是建立在螺旋横刀工作在旋耕刀已耕区域的条件下,旋耕刀正切刃有一定的破茬宽度,后续螺旋横刀耕在旋耕刀正切刃与侧切刃之间过渡的圆弧处时,旋耕刀对后续螺旋横刀起到了完全破茬作用,能最大限度地降低螺旋横刀切土阻力,发挥秸秆掩埋优势^[25]。除旋耕刀要比螺旋横刀有更大的回转半径外,两者之间的夹角也影响后续螺旋横刀在接触地面过程中前进的距离是否超出旋耕刀所耕范围。

如图6所示,刀辊旋转中心 O 点位于地表上 H 处,取 O 点为坐标原点, x 轴与前进方向相同, y 轴竖直向下,以 x 轴水平方向为初始相位,以角速度 ω 匀速旋转,同时刀辊以速度 v_m 匀速前进。螺旋横刀刃口 M 与旋耕刀刃口 N 位于同一回转截面,其中刃口 N 的旋转半径 $R_0(\varphi)$ 与其相位角 φ 一一映射,刃口 M 的旋转半径为定值 R ,相位角相对于刃口 N 滞后 $\Delta\varphi$ 。刀辊转动后,刃口 M 、 N 与地表接触所需转动的角度分别为 φ_M 、 φ_N ,期间对应刀辊前进的距离 S_M 、 S_N 可表示为

$$S_M = \frac{\varphi_M}{\omega} v_m = \left(\Delta\varphi + \varphi + \arcsin \frac{H}{R} \right) \frac{v_m}{\omega} \quad (2)$$

$$S_N = \frac{\varphi_N}{\omega} v_m = \left(\varphi + \arcsin \frac{H}{R_0(\varphi)} \right) \frac{v_m}{\omega} \quad (3)$$

螺旋横刀刃口 M 的切土位置 M_1 的横坐标 x_M 为

$$x_M = \sqrt{R^2 - H^2} + S_M \quad (4)$$

旋耕刀刃口 N 的切土位置 N_1 的横坐标 x_N 为

$$x_N = \sqrt{R_0^2(\varphi) - H^2} + S_N \quad (5)$$

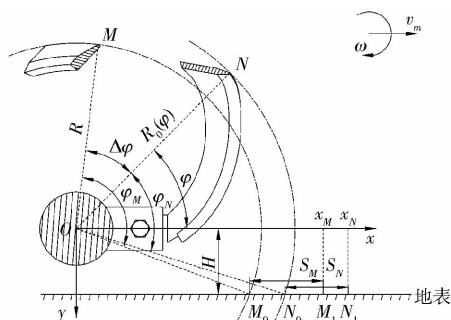


图6 刃口切土位置数学模型

Fig. 6 Mathematical model of cutting position

定义螺旋横刀与旋耕刀切土位置相同的两刃口之间的相位夹角为两刀的装配夹角,当 $x_M = x_N$,

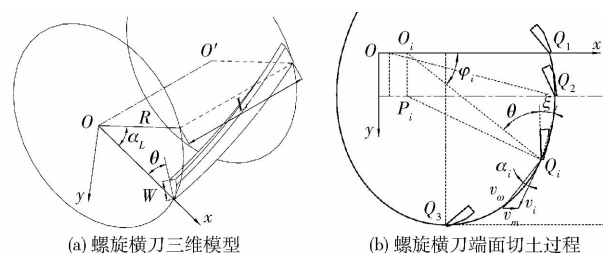
M_1 与 N_1 重合,刃口 M 和刃口 N 切土位置相同, $\Delta\varphi$ 即为装配夹角,将式(2)~(5)整合并代入等式 $x_M = x_N$ 中得

$$\Delta\varphi = \left(\sqrt{R_0^2(\varphi) - H^2} - \sqrt{R^2 - H^2} \right) \frac{\omega}{v_m} + \arcsin \frac{H}{R_0(\varphi)} - \arcsin \frac{H}{R} \quad (6)$$

旋耕刀正切刃至侧切刃过渡圆弧处刃口的旋转半径为 $R_0(45^\circ) = 0.238$ m,完全破茬时,两刀的装配夹角 $\Delta\varphi$ 为 59° 。

2.3 螺旋横刀参数优化

螺旋横刀为大螺距螺旋体,沿刀刃有固定的旋转半径、静态滑切角^[26]和静态切土角^[27]。为实现压覆秸秆的功能,防止未切断的秸秆沿刃口曲线滑脱,螺旋横刀的滑切角需小于与秸秆的摩擦角^[28-29],耕作时刃口相当于被秸秆包裹,随着刀辊转动,将其压入土壤。前期研究成果表明现有螺旋横刀的滑切角能够满足压秆掩埋的实际需求^[30],但目前螺旋横刀仍存在切削阻力过大的问题。建立螺旋横刀切土过程的数学模型,如图7所示。



(a) 螺旋横刀三维模型

(b) 螺旋横刀端面切土过程

图7 螺旋横刀切土过程的数学模型

Fig. 7 Mathematical model diagrams of process of cutting soil with helical blade

螺旋横刀在切削土壤时,为了防止刀背抵压未耕土壤,参数需满足

$$\theta + \xi + \alpha_i \leq 90^\circ \quad (7)$$

式中 θ ——螺旋横刀安装角, ($^\circ$)

ξ ——螺旋横刀磨刃角, ($^\circ$)

α_i ——圆周速度与切削速度的夹角, ($^\circ$)

在图7b中根据位置三角形 $O_i P_i Q_i$ 与速度三角形(圆周速度 v_ω 、牵引速度 v_m 、切削速度 v_i)相似的数学关系,并在三角形 $O_i P_i Q_i$ 中由正弦定理可求得转角 φ_i 与速度夹角 α_i 的关系为

$$\alpha_i = \arctan \frac{\cos \varphi_i}{\lambda - \sin \varphi_i} \quad (8)$$

其中

$$\lambda = v_\omega / v_m$$

由于螺旋横刀的安装角 θ 与静态切土角互余,所以 θ 值越大时,切土阻力越小,将 α_i 的最大值(Q_2 处)代入式(7)则

$$\theta \leq 90^\circ - \xi - \arcsin \frac{1}{\lambda} \quad (9)$$

考虑到秸秆由螺旋横刀压入土壤后,与土壤在相互揉搓中撕裂破碎,螺旋横刀出土拨动并抛起土壤,覆盖表层未完全压覆的秸秆,进一步增加秸秆的埋覆效果。抛土量可由螺旋横刀的抛土宽度定性表示为

$$W_p=W\cos\theta \tag{10}$$

式中 W_p ——静态抛土宽度,mm
 W ——螺旋横刀宽度,mm

1GMC-70 型旋耕埋草机选用了较小的安装角^[30-31]以增加抛土量,为了达到与 1GMC-70 型旋耕埋草机相同的秸秆埋覆效果,同时降低切削阻力,通过加大刀宽弥补因安装角变大而损失的抛土宽度。螺旋横刀安装角 θ 由 17° 增至 50° ,满足式(9)的要求,刀宽 W 由最初的 25 mm 增至 35 mm,满足式(10)的要求。

3 田间试验

3.1 刀辊农田适应性检测试验

3.1.1 试验条件和试验仪器

2017 年 1 月在华中农业大学现代农业科技试验基地,开展人字型水旱两用旋埋刀辊农田适应性检测试验。共选取 5 块试验田,进行不同程度泡水处理,耕前参数如表 2 所示。所选的 5 块试验田土壤类型均为长江中下游常见的水稻土,粘性质地,田内为晚稻收获后经晾晒的秸秆,秸秆高度在 30 ~ 60 cm 之间。由泰山 904A 型轮式拖拉机驱动,作业速度为 0.6 ~ 0.8 m/s。检测仪器主要有:JEA-2002 型多功能电子天平(上海浦春计量仪器有限公司,精度:0.01 g)、TJSD-750 型土壤坚实度测定仪(浙江托普云农科技股份有限公司)、土壤水分测试仪(英国 DELTA-T 公司)、钢卷尺、钢尺、水平仪、自制 1 m²方框等。

表 2 耕前参数

Tab.2 Parameters before tillage

田块 序号	土壤含水 率/%	土壤坚实度/ kPa	秸秆量/ (g·m ⁻²)	泡水 时间/h
I	25.03	1 479	965	0
II	31.10	1 236	1 314	0
III	43.57	1 089	1 128	3
IV	45.70	994	1 024	3
V	51.17	617	1 205	12

3.1.2 试验检测项目

依据 GB/T 24685—2009《水田平地搅浆机》和 GB/T 5668—2008《旋耕机》并结合实际情况确定试验检测项目:耕深、耕深稳定性系数、耕后单幅平整度、秸秆埋覆率,所有测量项目均为 5 个行程的均值。检测指标参考文献[32]中组合刀辊的设计

指标。

(1) 耕深及耕深稳定性系数

使用钢尺插入测量区中耕后土壤读取耕深数值,以 2 m 为间隔左右两侧各测定一点,每行程总测量点数为 20 点。耕深及耕深稳定性系数计算公式为

$$h=\frac{\sum_{i=1}^nh_i}{n} \tag{11}$$

$$U=\left[1-\frac{1}{h}\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n(h_i-h)^2}{n-1}}\right]\times 100\% \tag{12}$$

式中 h ——耕深,cm
 h_i ——所测行程中第 i 个位置的耕深,cm
 n ——所测行程的总测量点数
 U ——耕深稳定性系数, %

(2) 耕后单幅平整度

在耕幅内沿垂直于机具前进方向放置水平仪,并将水平仪按长度 10 等分,测定各等分点至地表的距离,计算其标准差。每行程随机测 3 个位置,所有测量位置数据标准差的均值即为耕后单幅平整度。

(3) 秸秆埋覆率

在每个行程测量区中随机选取一点放置 1 m²方框,测量方框内所有未被埋覆的秸秆质量,秸秆埋覆率计算公式为

$$M=\left(1-\frac{m_h}{m_q}\right)\times 100\% \tag{13}$$

式中 M ——秸秆埋覆率, %
 m_q ——耕前单位面积秸秆质量, g/m²
 m_h ——耕后单位面积未被埋覆秸秆质量, g/m²

3.1.3 试验结果与分析

人字型水旱两用旋埋刀辊田间试验结果如表 3 所示,耕后效果如图 8 所示。

表 3 田间作业性能检测结果

Tab.3 Measurement results of working performance

田块序号	耕深/ cm	耕深稳定 性系数/%	耕后单幅 平整度/cm	秸秆埋覆 率/%
I	15.94	90.63	2.46	90.25
II	17.51	92.67	2.12	92.48
III	18.44	92.22	1.63	93.54
IV	18.49	92.77	1.75	92.38
V	20.14	95.45	2.04	94.33
均值	18.10	92.75	2.00	92.60
指标	≥15	≥85	≤3	≥90

由表 3 可知,所有检测项目均达到标准要求。但刀辊在田块 I 中的耕后效果相对于其他田块,明



图 8 刀辊耕后效果

Fig.8 Diagrams after tillage of herringbone type rotary blade roller

显较差,耕深、耕深稳定性系数、耕后单幅平整度大幅低于平均值,秸秆量 965 g/m^2 ,但埋覆率仅有 90.25%,这与土壤含水率有直接关系。坚实度仪不断贯入土壤的过程中,不仅要克服与土壤的摩擦力,而且探头壁带动粘附的土壤颗粒向下运动,还要克服由土壤层间摩擦形成的粘滞力,与刀具切削过程一致。由表 2 看出,试验田土壤的坚实度随含水率的上升呈下降趋势,对于田块 I 而言,由于缺乏足够的水分润滑,田块耕作阻力较大,耕深相对较浅,耕深稳定性较差。从土壤变形角度来看,25.03%的含水率使土壤表现出极强的粘塑性,土壤能够承受较大的塑性形变而不会轻易断裂、破碎,随着刀片沿余摆线运动,因切削与地面分离的垡块被刀片抛起,在离心力和后续刀具的作用下分解为若干泥块散落土层表面。由于碎土不充分导致秸秆不能均匀覆盖,地表平整度差,需经拖板镇压刮平。因此对于粘性土壤而言,土壤粘塑性较强时,耕作难度较大。

3.2 优化验证试验

3.2.1 试验条件与方法

为验证刀辊优化结果,2017 年 12 月进行不同工况转速下刀辊排列方式及螺旋横刀安装角对比试验,试验因素水平见表 4。试验田为粘性土壤,泡水 12 h,坚实度为 642 kPa,含水率为 51.75%,天然密度为 1.70 g/cm^3 ,田间为晚稻秸秆,高 54.4 cm,秸秆量为 $1\,420\text{ g/m}^2$ 。各刀辊幅宽均设计为 220 cm,使用刀宽为 35 mm 的螺旋横刀,机具由东方红 LX954 型轮式拖拉机驱动,使用低速 3 挡,输出转速设置为 540、630、720 r/min 3 种工况,共计 4 种刀辊,每种工况各刀辊均重复 3 次,每次行程 20 m,整个试验保

持 18 cm 的耕深不变,试验现场如图 9 所示。

表 4 优化检测试验因素水平
Tab.4 Testing factors and levels of optimized test experiment

水平	因素		
	拖拉机输出转速/ ($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)	刀辊排列 方式	螺旋横刀安装 角/($^{\circ}$)
1	540	人字型	35
2	630	交错型	50
3	720		



图 9 田间试验现场

Fig.9 Field test site

由于作业环境一致,耕作效果的差异主要来自机具,水田耕整后因刀辊结构不同造成平整度的差异大多被刀辊后的拖板所掩盖,作为以秸秆还田见长的耕整刀辊,往往最关心的是还田效果及功耗,为更好说明刀辊的优劣,选取秸秆埋覆率和功耗为检测项目进行验证,功率由动态转矩转速传感器(北京中航科仪测控技术有限公司,转速测量范围 0 ~ 4 000 r/min;扭矩测量范围 0 ~ 3 000 N·m)测量,经无线动态数据采集器采集计算后,储存在计算机中。

3.2.2 试验结果与分析

表 5 为刀辊优化验证田间试验结果,从秸秆埋覆效果来看,仅有 2 号刀辊和 4 号刀辊出现埋覆率不足 90% 的情况,所用螺旋横刀安装角均为 35°,经计算装配 35°安装角刀辊的平均埋覆率为 89.67%,而 50°的为 91.08%,刀宽一定时安装角越小抛土宽度越大,埋覆效果应该越好,出现这种情况很有可能与水田土壤性质有关,粘性土壤含水率较大经旋耕刀切削搅拌后呈泥浆状,表现出一定的流体特征,堆积效果差,螺旋横刀带动泥浆的瞬间,泥浆会因重力滑离刀片,所以两种螺旋横刀实际抛土量不高且相差不大,秸秆埋覆的主要方式则是压覆,35°安装角比 50°安装角在耕作时刀口上扬 15°,意味着压覆秸秆时 35°安装角螺旋横刀刀口对秸秆的切碎效果不如 50°,刀辊连续转动,将有未切断的秸秆被刀口带出地表,在质地较软的土壤中表现更明显。

从刀辊的功耗角度来看,在拖拉机输出转速提升时,功耗有上升趋势;装配 50°安装角螺旋横刀的人字型刀辊与交错型刀辊相比,在 3 个转速工况下

表 5 刀辊对比试验验证结果

Tab.5 Measurement results of comparative tests					
刀辊种 类编号	排列 方式	螺旋横刀安 装角/(°)	拖拉机输出转 速/(r·min ⁻¹)	秸秆埋 覆率/%	功耗/ kW
1	人字型	50	540	90.58	33.10
			630	91.65	33.73
			720	91.40	38.18
2	人字型	35	540	88.29	35.52
			630	90.11	38.51
			720	90.35	43.87
3	交错型	50	540	91.51	35.78
			630	91.01	40.57
			720	90.33	38.31
4	交错型	35	540	91.53	42.83
			630	87.69	42.25
			720	90.03	44.68

降低功耗 7.49%、16.85% 和 0.34%，装配 35°螺旋横刀时降低功耗 17.01%、8.85% 和 1.81%；50°螺旋横刀与 35°螺旋横刀装配在人字型刀辊中对比时，在 3 个转速工况下降低功耗 6.81%、12.41% 和 12.91%，在交错型刀辊中降低功耗 16.46%、3.98% 和 14.26%。从上述分析中可见，螺旋横刀优化后，切土阻力较优化前显著降低；人字型刀辊两侧螺旋式渐进入土，切土平稳，刀盘旋耕刀有助于为螺旋横刀创造更有利的入土环境，从而达到节能降耗的目的。

4 结论

(1)基于离散元方法,优化了组合刀辊的排列方式,形成一种人字型水旱两用旋埋刀辊;该刀辊采用人字型对称结构,土壤对刀具的侧向反作用力被抵消,两侧刀具螺旋式渐进入土,作业性能稳定可靠;优化螺旋横刀安装角和装配角,分别为 50°和 59°,进一步降低了螺旋横刀的耕作阻力;刀盘装配旋耕刀,增强了螺旋横刀的入土和耕作性能,同时增加旋耕刀轴向排布间隔以防壅土。

(2)不同田块间刀辊性能检测试验结果表明,该设计刀辊适用于大多数水稻田的秸秆埋覆与土壤耕作,耕深均值 18.10 cm、耕深稳定性系数均值 92.75%、耕后单幅平整度均值 2.00 cm、秸秆埋覆率均值 92.60%，均达到设计指标,满足农艺栽培要求,其中水田与旱地相比,有更好的耕作效果。

(3)为验证刀辊优化结果,以秸秆埋覆率与作业功耗为考核目标,对刀辊排列形式和螺旋横刀安装角进行田间对比试验,结果表明:在水田中刀辊埋覆秸秆主要靠螺旋横刀的压覆效应,安装角在秸秆切断能力方面间接影响埋覆效果;在不降低秸秆埋覆效果的情况下,人字型排列较交错型降低能耗 0.34%~17.01%,50°安装角的螺旋横刀较 35°的降低功耗 6.81%~16.46%，达到了节能降耗的优化目的。

参 考 文 献

[1] 范明生,江荣风,张福锁,等. 水旱轮作系统作物养分管理策略[J]. 应用生态学报,2008,19(2): 424-432.
FAN Mingsheng, JIANG Rongfeng, ZHANG Fusuo, et al. Nutrient management strategy of paddy rice-up land crop rotation system[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, 19(2): 424-432. (in Chinese)

[2] 张国忠,许绮川,夏俊芳,等. 1GMC-70 型船式旋耕埋草机的设计[J]. 农业机械学报,2008,39(10): 214-217.
ZHANG Guozhong, XU Qichuan, XIA Junfang, et al. Design of 1GMC-70 ship type rotary tillage buried grass machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(10): 214-217. (in Chinese)

[3] 张北赢,陈天林,王兵. 长期施用化肥对土壤质量的影响[J]. 中国农学通报,2010,26(11): 182-187.
ZHANG Beiyang, CHEN Tianlin, WANG Bing. Effects of long-term uses of chemical fertilizers on soil quality[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2010, 26(11): 182-187. (in Chinese)

[4] YIN H, ZHAO W, LI T, et al. Balancing straw returning and chemical fertilizers in China: role of straw nutrient resources[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, 81, Part2: 2695-2702.

[5] CHEN J, ZHENG M, PANG D, et al. Straw return and appropriate tillage method improve grain yield and nitrogen efficiency of winter wheat[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2017, 16(8): 1708-1719.

[6] 朱瑞祥,薛少平,张秀琴,等. 机械化玉米秸秆还田对土壤水肥状况的动态研究[J]. 农业工程学报,2001,17(4): 39-42.
ZHU Ruixiang, XUE Shaoping, ZHANG Xiuqin, et al. Dynamic research on soil water and fertility condition after mechanized returning corn stalks into the soil[J]. Transactions of the CSAE, 2001, 17(4): 39-42. (in Chinese)

[7] 夏俊芳,张国忠,许绮川,等. 多熟制稻作区水田旋耕埋草机的结构与性能[J]. 华中农业大学学报,2008,27(2): 331-334.
XIA Junfang, ZHANG Guozhong, XU Qichuan, et al. Research on the mechanized technology of rotary tillage and stubble-mulch for paddy field under multiple rice cropping system[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2008, 27(2): 331-334. (in Chinese)

[8] 常志州,陈新华,杨四军,等. 稻麦秸秆直接还田技术发展现状及展望[J]. 江苏农业学报,2014,30(4): 909-914.
CHANG Zhizhou, CHEN Xinhua, YANG Sijun, et al. A review on technique for rice and wheat straws returning and utilization[J]. Jiangsu Journal of Agricultural Sciences, 2014, 30(4): 909-914. (in Chinese)

[9] 郑智旗,何进,李洪文,等. 动定刀支撑滑切式秸秆粉碎装置设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(增刊): 108-116.
ZHENG Zhiqi, HE Jin, LI Hongwen, et al. Design and experiment of straw-chopping device with chopping and fixed knife supported slide cutting[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(Supp.): 108-116.

- http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2016s017&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.S0.017. (in Chinese)
- [10] 林静,马铁,李宝筏.1JHL-2型秸秆深埋还田机设计[J].农业工程学报,2017,33(20):32-40.
LIN Jing,MA Tie,LI Baofa.Design of 1JHL-2 type straw deep bury and returning machine[J].Transactions of the CSAE,2017,33(20):32-40. (in Chinese)
- [11] 周勇,余水生,夏俊芳.水田高茬秸秆还田耕整机设计与试验[J/OL].农业机械学报,2012,43(8):46-49.
ZHOU Yong,YU Shuisheng,XIA Junfang.Design and experiment of cultivator for high straw returning in paddy field[J/OL].Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2012,43(8):46-49.http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20120809&flag=1&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.08.009. (in Chinese)
- [12] 王金武,王奇,唐汉,等.水稻秸秆深埋整秆还田装置设计与试验[J/OL].农业机械学报,2015,46(9):112-117.
WANG Jinwu,WANG Qi,TANG Han,et al.Design and experiment of rice straw deep buried and whole straw returning device[J/OL].Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2015,46(9):112-117.http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150916&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.09.016. (in Chinese)
- [13] 张居敏,夏俊芳,周勇.组合式秸秆还田旋耕刀辊:201420492743.0[P].2014-12-31.
- [14] CHEN Y,MUNKHOLM L J,NYORD T.A discrete element model for soil-sweep interaction in three different soils[J].Soil & Tillage Research,2013,126:34-41.
- [15] LI B,CHEN Y,CHEN J.Modeling of soil-claw interaction using the discrete element method (DEM)[J].Soil and Tillage Research,2016,158:177-185.
- [16] 方会敏,姬长英,AHMED A T,等.秸秆-土壤-旋耕刀系统中秸秆位移仿真分析[J/OL].农业机械学报,2016,47(1):60-67.
FANG Huimin,JI Changying,AHMED A T,et al.Simulation analysis of straw movement in straw-soil-rotary blade system[J/OL].Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2016,47(1):60-67.http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160109&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.01.009. (in Chinese)
- [17] 中国农业机械化科学研究院.农业机械设计手册:上册[M].北京:中国农业科学技术出版社,2007:244-245.
- [18] 丁启朔,任骏,ADAM B E,等.湿粘水稻土深松过程离散元分析[J/OL].农业机械学报,2017,48(3):38-48.
DING Qishuo,REN Jun,ADAM B E,et al.DEM analysis of subsoiling process in wet clayey paddy soil[J/OL].Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2017,48(3):38-48.http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170305&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.03.005. (in Chinese)
- [19] 王学振,岳斌,高喜杰,等.深松铲不同翼铲安装高度时土壤扰动行为仿真与试验[J/OL].农业机械学报,2018,49(10):124-136.
WANG Xuezheng,YUE Bin,GAO Xijie,et al.Discrete element simulations and experiments of disturbance behavior as affected by mounting height of subsoiler's wing[J/OL].Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2018,49(10):124-136.http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20171014&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.10.014. (in Chinese)
- [20] 熊平原,杨洲,孙志全,等.基于离散元法的旋耕刀三向工作阻力仿真分析与试验[J].农业工程学报,2018,34(18):113-121.
XIONG Pingyuan,YANG Zhou,SUN Zhiqian,et al.Simulation analysis and experiment for three-axis working resistances of rotary blade based on discrete element method[J].Transactions of the CSAE,2018,34(18):113-121. (in Chinese)
- [21] 赵淑红,刘宏俊,谭贺文,等.仿旗鱼头部曲线型开沟器设计与性能试验[J].农业工程学报,2017,33(5):32-39.
ZHAO Shuhong,LIU Hongjun,TAN Hewen,et al.Design and performance experiment of opener based on bionic sailfish head curve[J].Transactions of the CSAE,2017,33(5):32-39. (in Chinese)
- [22] HANG C,HUANG Y,ZHU R.Analysis of the movement behaviour of soil between subsoilers based on the discrete element method[J].Journal of Terramechanics,2017,74:35-43.
- [23] 贾洪雷,黄东岩,刘晓亮,等.耕作刀片在刀辊上的多头螺旋线对称排列法[J].农业工程学报,2011,27(4):111-116.
JIA Honglei,HUANG Dongyan,LIU Xiaoliang,et al.Symmetrical multi-spiral arrangement of tillage blades on rotor[J].Transactions of the CSAE,2011,27(4):111-116. (in Chinese)
- [24] 丁为民,徐志刚,汪小昆.斜置旋耕刀滑切角及其方程[J].农业工程学报,2002,18(3):49-53.
DING Weimin,XU Zhigang,WANG Xiaochan.Grass sliding cutting angles and their equations of oblique rotary blades[J].Transactions of the CSAE,2002,18(3):49-53. (in Chinese)
- [25] 张秀梅,张居敏,夏俊芳,等.水旱两用秸秆还田耕整机关键部件设计与试验[J].农业工程学报,2015,31(11):10-16.
ZHANG Xiumei,ZHANG Jumin,XIA Junfang,et al.Design and experiment on critical component of cultivator for straw returning in paddy field and dry land[J].Transactions of the CSAE,2015,31(11):10-16. (in Chinese)
- [26] 丁为民,彭嵩植.旋耕刀滑切角及滑切角方程的研究[J].农业工程学报,1995,11(4):67-72.
DING Weimin,PENG Songzhi.Research on grassremoving angles and equations of rotary blades[J].Transactions of the CSAE,1995,11(4):67-72. (in Chinese)

- [26] MORAN P A P. Notes on continuous stochastic phenomena[J]. *Biometrika*,1950, 37(1-2):17-23.
- [27] 史海滨,陈亚新. 土壤水分空间变异的套合结构模型及区域信息估值[J]. *水利学报*,1994(7):70-77,89.
SHI Haibin, CHEN Yaxin. Combination structure model of soil moisture spatial variability and regional information estimation [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1994(7):70-77,89. (in Chinese)
- [28] 江贵荣. 干旱区不同尺度土壤盐分空间变异特征及不确定性分析[D]. 武汉:中国地质大学,2012.
- [29] 魏复盛,陈静生,吴燕玉,等. 中国土壤环境背景值研究[J]. *环境科学*,1991,12(4):12-20.
WEI Fusheng, CHEN Jingsheng, WU Yanyu, et al. Study on the background contents on elements of soils in China[J]. *Chinese Journal of Environmental Science*,1991,12(4):12-20. (in Chinese)
- [30] 中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值[M]. 北京:中国环境科学出版社,1990:329-492.
- [31] 文雯,侯振安,闵伟,等. 石河子垦区耕地土壤重金属调查及评价研究[J]. *新疆农业科学*,2015, 52(1):137-144.
WEN Wen, HOU Zhen'an, MIN Wei, et al. Investigation and evaluation of heavy metals in farmland soil in Shihezi reclamation area [J]. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2015, 52(1):137-144. (in Chinese)
- [32] 成杭新,李括,李敏,等. 中国城市土壤化学元素的背景值与基准值[J]. *地学前缘*,2014,21(3):265-306.
CHENG Hangxin, LI Kuo, LI Min, et al. Geochemical background and baseline value of chemical elements in urban soil in China[J]. *Earth Science Frontiers*,2014,21(3):265-306. (in Chinese)
- [33] TENG Mingjun, ZENG Lixiong, XIAO Wenfa, et al. Spatial variability of soil organic carbon in Three Gorges Reservoir area, China[J]. *Science of the Total Environment*,2017,599-600:1308-1316.
- [34] 吴文勇,尹世洋,刘洪禄,等. 污灌区土壤重金属空间结构与分布特征[J]. *农业工程学报*,2013,29(4):165-173.
WU Wenyong, YIN Shiyang, LIU Honglu, et al. Spatial structure and distribution characteristics of soil heavy metals in wastewater irrigation district[J]. *Transactions of the CSAE*, 2013, 29(4): 165-173. (in Chinese)
- [35] QISHLAQI A, MOORE F, FORGHANI G. Characterization of metal pollution in soils under two landuse patterns in the Angouran region, NW Iran: a study based on multivariate data analysis[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 172(1): 374-384.
- [36] 张天蛟,刘刚,王圣伟. 基于 GIS/RS 的不同土地利用类型重金属面源污染比较[J/OL]. *农业机械学报*,2014,45(增刊):124-132.
ZHANG Tianjiao, LIU Gang, WANG Shengwei. Estimation of heavy metal pollution loads from non-point sources based on GIS/RS[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014,45(Supp.):124-132. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2014s121&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.S0.021. (in Chinese)
- [37] 代杰瑞,庞绪贵,王红晋,等. 山东省平阴县土壤中重金属元素异常成因[J]. *物探与化探*,2010,34(5):659-663.
DAI Jierui, PANG Xugui, WANG Hongjin, et al. The causes of the soil heavy metal anomalies in Pingyin County, Shandong Province[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*,2010,34(5):659-663. (in Chinese)

(上接第57页)

- [27] 丁为民,王耀华,彭嵩植. 反转旋耕刀正切面分析及参数选择[J]. *农业机械学报*,2004,35(4):40-43.
DING Weimin, WANG Yaohua, PENG Songzhi. Analysis on sidelong portion of up-cut rotary blade[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*,2004,35(4):40-43. (in Chinese)
- [28] YOU Y, WANG D, LIU J. A device for mechanical remediation of degraded grasslands[J]. *Soil and Tillage Research*,2012, 118(1):1-10.
- [29] 丁为民,彭嵩植. 旋耕刀滑切角及滑切角方程的研究[J]. *农业工程学报*,1995,11(4):67-72.
DING Weimin, PENG Songzhi. Research on grassremoving angles and equations of rotary blades[J]. *Transactions of the CSAE*, 1995,11(4):67-72. (in Chinese)
- [30] 张居敏,周勇,夏俊芳,等. 旋耕埋草机螺旋横刀的数学建模与参数分析[J]. *农业工程学报*,2013,29(1):18-25.
ZHANG Jumin, ZHOU Yong, XIA Junfang, et al. Mathematical modeling and analysis of helical blade for stubble burying rotary tiller[J]. *Transactions of the CSAE*,2013,29(1):18-25. (in Chinese)
- [31] 张居敏,夏俊芳,张甜,等. 旋耕埋草机螺旋横刀制造工艺误差及影响[J]. *湖南农业大学学报(自然科学版)*,2014, 40(1):89-95.
ZHANG Jumin, XIA Junfang, ZHANG Tian, et al. Process errors in manufacturing helical blade for stubble burying rotary tiller and their influences on tillage[J]. *Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences)*, 2014,40(1):89-95. (in Chinese)
- [32] 张秀梅,夏俊芳,张居敏,等. 水旱两用秸秆还田组合刀辊作业性能试验[J]. *农业工程学报*,2016,32(9):9-15.
ZHANG Xiumei, XIA Junfang, ZHANG Jumin, et al. Working performance experiment of combination blade roller for straw returning in paddy field and dry land[J]. *Transactions of the CSAE*,2016,32(9):9-15. (in Chinese)